

DAS ROTUNDAS CONVENCIONAIS ÀS TURBOROTUNDAS

Ana Bastos Silva¹, António Luís Vasconcelos² e Sílvia Santos¹

¹Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade de Coimbra, Portugal

email: abastos@dec.uc.pt <http://www.dec.uc.pt>

² Instituto Politécnico de Viseu, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Repeses, 3504-510 Viseu, Portugal

Sumário

O conceito de turborotunda surgiu recentemente, na Holanda, como solução alternativa à rotunda normal com múltiplas vias, com o objetivo de resolver os problemas de segurança relacionados com entrecruzamentos no anel de circulação. Embora sejam poucos os estudos científicos que abordam esta matéria, a experiência estrangeira mostra que esta solução assegura elevados níveis de desempenho geral. Nesse contexto, o presente artigo apresenta o conceito de turborotunda e as suas potencialidades comparativamente à rotunda normal, quer em termos de segurança quer de capacidade. Complementarmente, são apresentadas algumas regras básicas de apoio ao seu dimensionamento geométrico e à estimação de capacidades.

Palavras-chave: Turborotunda; rotundas; desempenho; dimensionamento; segurança rodoviária.

1 INTRODUÇÃO

As rotundas tradicionais de nível têm vindo a afirmar-se, ao longo das últimas décadas, como excelentes soluções em termos de custo-benefício, respondendo com elevado nível de eficiência a múltiplas funções, designadamente à regulação do trânsito, acalmia de tráfego, requalificação urbana e paisagística, etc. A experiência adquirida com a sua aplicação em diversos países tem vindo a comprovar esses benefícios, designadamente quando comparados com outros cruzamentos tradicionais de nível [1–3].

Os benefícios ao nível da segurança rodoviária têm sido largamente debatidos a nível internacional, como reflexo da sua capacidade em reduzir e homogeneizar a distribuição das velocidades na zona de entrada e atravessamento. É habitual encontrar referência a reduções compreendidas entre os 40 e os 70% no nível de sinistralidade, assim como a redução significativa da gravidade dos acidentes, por eliminação dos conflitos secantes [4,5]. Mas a redução em mais de 95% do número de mortos [2,3], foi porventura o indicador que mais contribuiu para a sua disseminação em praticamente todo o mundo, durante as décadas de 60 e 70. Em Portugal, desde a década de 80 que esta solução se tem expandido a todo o país, sendo hoje utilizada tanto em áreas urbanas como interurbanas [1]. São as rotundas com duas vias de entrada e de circulação as mais comuns em Portugal, aplicadas maioritariamente em circulares urbanas e em espaços suburbanos.

Apresentando um nível geral de desempenho excelente, a experiência adquirida a nível internacional, ao longo dos últimos 30 anos, tem vindo a evidenciar alguns problemas de funcionamento os quais o enquadramento legal nem sempre consegue colmatar de forma eficaz.

De facto, a necessidade de responder a níveis de capacidade elevados tem vindo a justificar, cada vez mais, o recurso a soluções com múltiplas vias de entrada e circulação. Estas soluções, embora mantenham excelentes níveis de desempenho geral, têm vindo a evidenciar alguns problemas de funcionamento particularmente relacionados com a adoção de comportamentos erráticos nas zonas da entrada, anel e saída, sendo estes problemas mais frequentes e graves à medida que aumenta o número de vias disponibilizadas. Esses comportamentos têm-se traduzido em conflitos e, por vezes, em acidentes, embora geralmente de pequena gravidade.

O conceito de turborotunda surgiu assim recentemente na Holanda como forma de ultrapassar esses problemas, afirmando-se como uma solução alternativa às rotundas com múltiplas vias. Apesar do seu enraizamento em alguns

países do norte da Europa, a falta de trabalhos publicados sobre esta temática, agravada pela falta de experiência em termos de aplicações práticas do conceito, leva a que a sua expansão a outros países seja ainda encarada com muita precaução, designadamente em Portugal.

Nesse contexto, este artigo procura, por um lado, apresentar o conceito e avaliar a sua adaptabilidade às condições de circulação nacionais e, por outro lado, contribuir para um melhor entendimento sobre as suas potencialidades comparativamente à rotunda normal. Os vários estudos desenvolvidos permitem concluir que os benefícios em termos de segurança são significativos e facilmente justificáveis pela redução substancial do número de pontos de conflito. Em termos de capacidade os benefícios não são tão evidentes, dependendo do cenário adotado. Estudos nacionais enfatizam o peso associado à repartição direcional do tráfego e ao *layout* adotado no desempenho geral da solução. Finalmente, apresentam-se algumas regras gerais de apoio ao seu dimensionamento geométrico, assim como um modelo matemático de estimação de capacidades, calibrado para as condições nacionais.

2 PRINCIPAIS PROBLEMAS DE FUNCIONAMENTO EM ROTUNDAS NORMAIS

O recurso a rotundas normais com múltiplas vias tem-se revelado indispensável como resposta às exigências da procura de tráfego. Contudo, e apesar do nível de capacidade da rotunda aumentar com o número de vias disponibilizadas, o nível de segurança reduz significativamente. Esses problemas prendem-se maioritariamente com a adoção de comportamentos erráticos nas zonas de entrada, anel e saída e com as consequentes manobras de entrecruzamento dentro do anel.

Alguns trabalhos de investigação nacional [1,6], aplicados a rotundas de duas vias de entrada e de circulação, confirmaram a prática corrente de comportamentos de risco, associados muitas vezes ao traçado de trajetórias retilíneas e de mínimo esforço, os quais originam conflitos e potenciais acidentes. Em Portugal, cerca de 40% dos condutores que entram na rotunda pela via da direita, tendem a atravessar o anel a direito, invadindo a via da esquerda e cerca de 20% dos condutores dos que entram pela via da esquerda saem do anel através da via da direita, minimizando assim o seu incómodo na condução (ver Fig.1_a).

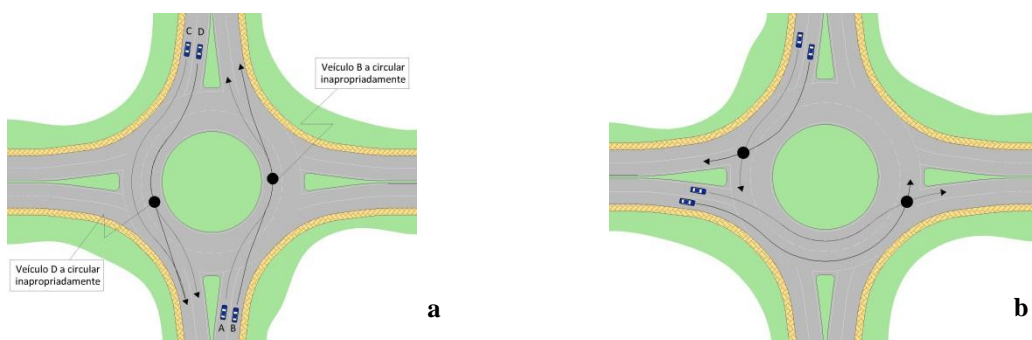


Fig.1. Comportamentos característicos no atravessamento de rotundas de múltiplas vias [1]

A deficiente sinalização ou pré-sinalização é, por vezes, outra característica que contribui para aumentar a dificuldade do condutor optar atempadamente pela via mais adequada ao seu destino.

Os conflitos enumerados são muitas vezes agravados, como no caso de Portugal, pela falta de enquadramento legal que defina procedimentos específicos a serem adotados nas rotundas. Consequentemente, é registado um número significativo de condutores que optam pela via do extradorso da rotunda para a execução de manobras de viragem à esquerda e de inversão de marcha (ver Fig.1_b).

Estes comportamentos reduzem significativamente os níveis de segurança, já que para além da hesitação e imprevisibilidade das manobras resultam num aumento substancial do número de potenciais pontos de conflito. Se a transformação de rotunda normal com apenas uma via de entrada e de circulação numa solução com duas vias se traduz num aumento de 8 para 24 pontos de conflito, a eventual prática de comportamentos erráticos dentro do anel poderá justificar o seu aumento para 32 (ver Fig.2). Complementarmente a adoção de múltiplas vias de circulação traduz-se na necessidade de salvaguardar larguras adicionais no anel, o que resulta, consequentemente, em dificuldades acrescidas para assegurar os níveis de deflexão adequados e na prática de velocidades elevadas.

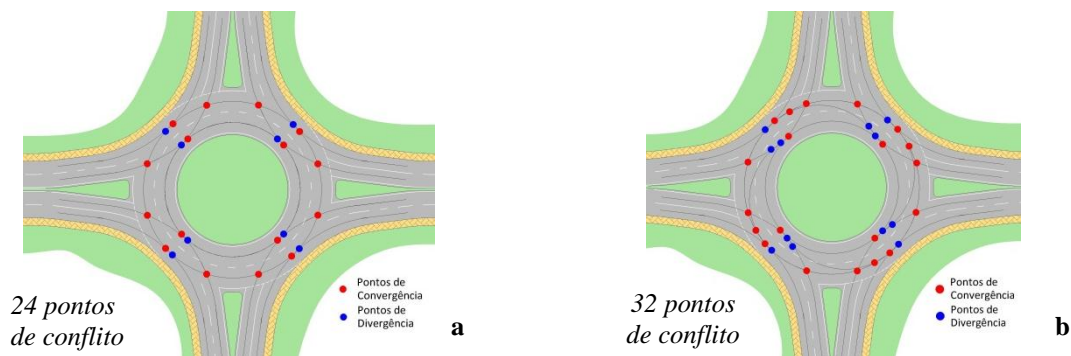


Fig.2. Pontos de conflito em rotundas de duas vias de circulação: (a) expectável; (b) comportamentos erráticos

Devido a estes problemas, alguns países têm vindo a condicionar a adoção de soluções com múltiplas vias de circulação, como é o caso da França [7,8], Alemanha [9] e Suíça [10], limitando o seu uso a situações devidamente justificadas. O Reino Unido [11] e a Austrália [12] têm procurado incorporar ilhéus complementares fisicamente materializados junto à entrada, de modo a imporem níveis de deflexão acrescidos e condicionarem a velocidade de entrada na rotunda. Apesar deste tipo de tentativas para colmatar a sinistralidade, verifica-se que os acidentes por entrecruzamentos nas rotundas, embora pouco graves, continuam a ser frequentes em muitos países, originando preocupações no sentido de colmatar este problema. Foi com esse objetivo que recentemente surgiu, na Holanda, o conceito de turborotunda.

3 CARACTERIZAÇÃO DA TURBOROTUNDA E SUAS TIPOLOGIAS

3.1 Conceito

O conceito de turborotunda surgiu em 1996, na Holanda, pelo investigador Lambertus Fortuijn, da Universidade de Delft. Trata-se de uma variante a uma rotunda normal com múltiplas vias, onde os condutores são canalizados para as vias mais adequadas às manobras pretendidas, através da criação de circuitos contínuos em espiral, delimitados fisicamente por lancis galgáveis no anel de circulação e zonas de entrada e saída [13] – ver Fig.3. Assente na necessidade de condicionar fisicamente o comportamento do condutor, o conceito apresenta-se com duas potencialidades relevantes: eliminação dos pontos de conflito relacionados com as manobras de entrecruzamento nas zonas conflituosas; e a redução da velocidade imposta pela presença de elementos de canalização física que impõem um aumento dos níveis de deflexão [14].



Fig.3. Turborotunda: (a) imagem de uma turborotunda; (b) e (c) pormenor da delimitação das vias na entrada e saída (Leiden, Holanda)

O conceito, que mereceu a sua primeira aplicação prática em 2000, na Holanda, foi posteriormente seguido na Polónia, e mais recentemente na Alemanha [9], Finlândia, Noruega e Eslovénia. Desde então a Holanda conta com mais de 190 turborotundas construídas, tendo já sido desenvolvidas disposições normativas (editadas em Abril de 2008) de apoio à sua conceção. Atualmente a administração central holandesa abandonou a construção de rotundas novas com múltiplas vias substituindo o conceito por turborotundas [15].

3.2 Layouts tipo

É possível contar com diversos tipos de *layouts*, os quais procuram responder a exigências e especificidades diferenciadas, designadamente em termos de níveis de repartição direcional da procura [16]. O fluxo dominante é o fator que mais tende a condicionar a seleção do *layout*. A Fig. 4 apresenta os layouts mais comuns, tendo por base os fluxos dominantes, adaptando-se quer a situações de tráfego desequilibrado ou equilibrado.

A Fig.4_a apresenta um *layout* adequado a locais cuja procura na via secundária é pouco significativa, podendo as entradas da via secundária apresentar uma (designada de *oval*) ou duas vias de entrada (designada de *Standart*). Por sua vez, a Fig.4_b (designada de *Knee*) representa uma solução particularmente adaptada a locais onde o movimento de viragem à direita é muito significativo, justificando a criação de uma via segregada para este movimento. A Fig.4_c (designada de *Spiral*) é particularmente adequada sempre que o movimento dominante coincida com o movimento de ida em frente, simultaneamente associado a um grande volume de viragens à esquerda e à direita. Já a Fig.4_d (designada de *Rotor*) representa o *layout* que melhor se adequa a níveis de procura relativamente equilibrados nos 4 ramos.

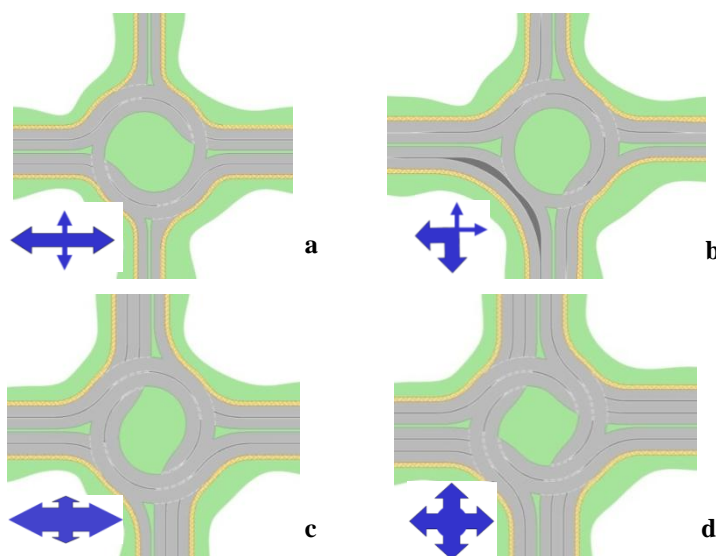


Fig.4. Fluxos dominantes e *Layouts* tipo: (a) Oval; (b) *Knee*; (c) *Spiral*; (d) *Rotor*

4 NÍVEIS DE DESEMPENHO DA TURBOROTUNDA

4.1 Segurança Rodoviária

São vários os estudos de segurança que apontam para uma redução do risco de acidentes em cerca de 80% [15] quando se transforma uma rotunda de duas vias numa turborotunda. Outros estudos baseados em técnicas de análise de conflitos aplicadas a nove *layouts* sujeitos a diferentes cenários de procura apontam, de forma consistente, para uma redução da frequência de acidentes entre 40 a 50% [17].

Estudos levados a cabo por Fortuijn [14], aplicados à rotunda normal de duas vias à turborotunda, concluem que é expectável que os veículos que circulam na via exterior da turborotunda atinjam velocidades inferiores aos que circulam na rotunda normal, resultados comprovados através de técnicas de microsimulação que mostram uma redução de 48 para 38 km/h. Estes resultados assemelham-se aos associados a uma rotunda de uma via.

Existem assim dois aspetos fundamentais que justificam esse aumento de segurança nas turborotundas: o condicionalismo imposto às trajetórias associadas às diferentes manobras, eliminando assim o número de pontos de conflito de 24 na rotunda normal de duas vias, para 14 na turborotunda (ver Fig.5); e os elementos de canalização física introduzidos nas entradas do anel e nas saídas da turborotunda, impondo níveis de deflexão mais acentuados, induzindo assim à redução da velocidade de entrada, circulação e saída do anel.

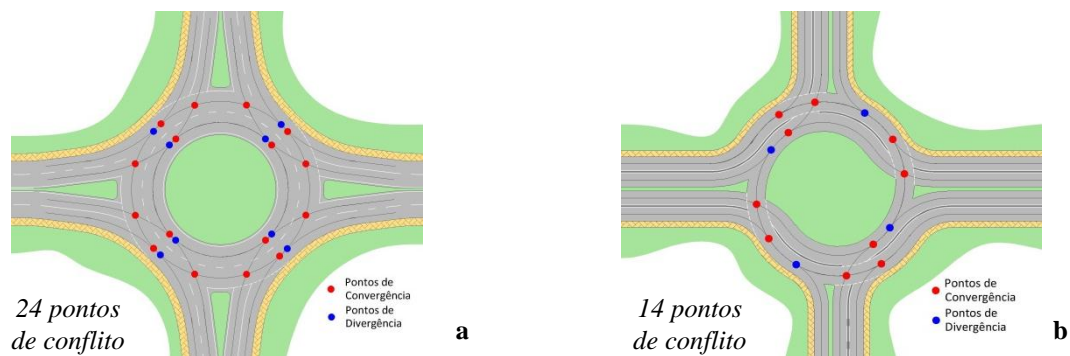


Fig.5. Pontos de conflito: (a) rotunda normal de duas vias; (b) turborotunda

Com a solução turborotunda é possível controlar os comportamentos de risco, normalmente existentes nas rotundas normais, forçando o condutor a adotar comportamentos corretos no atravessamento do anel e, conseqüentemente, obrigando-o a reduzir a velocidade de circulação antes, durante e imediatamente após a interseção.

4.2 Capacidade e Fluidez do trânsito

Em termos de capacidade, os resultados publicados não são consensuais. Alguns estudos científicos incidentes sobre esta temática [13,14] apontam para um aumento não negligenciável da capacidade, comparativamente a rotundas normais. Contudo essa tendência generalizada tem vindo a ser contrariada por estudos nacionais [18,19].

As análises desenvolvidas com base na aplicação de modelos probabilísticos [18,19] e de microssimulação [19], permitiram concluir que a capacidade da turborotunda tende a ser ligeiramente inferior à da rotunda normal, embora os resultados dependam fortemente do *layout* selecionado e da matriz de distribuição do tráfego considerada. Estes resultados correspondem ao expectável, já que a turborotunda impõe um modo de funcionamento mais rígido que a rotunda normal, inviabilizando o uso equilibrado das diferentes vias disponibilizadas à entrada, designadamente face à formação de filas de espera. Em termos de distribuição do tráfego concluiu-se que, para o *layout* do tipo *standard*, o desempenho da turborotunda tende a aumentar sempre que: *i*) aumenta o volume de viragens à direita a partir da via secundária; *ii*) aumenta o volume de ida em frente na via dominante; *iii*) existe uma repartição equilibrada do tráfego nos vários ramos e direções.

5 REGRAS GERAIS DE DIMENSIONAMENTO

5.1 Conceção geométrica

5.1.1 Princípios de base

O dimensionamento de uma turborotunda assenta em princípios básicos similares aos subjacentes ao dimensionamento de rotundas normais. Enumeram-se as seguintes regras gerais: *i*) perda de prioridade nas entradas da turborotunda em relação ao anel de circulação; *ii*) desincentivo a entrecruzamentos nas entradas (ao longo de uma extensão pré-definida), como dentro do anel de circulação; *iii*) o desenvolvimento da espiral deve ser do interior para o exterior e de forma contínua; *iv*) existir, em cada quadrante do anel, um ponto onde o condutor pode optar por sair ou por continuar o movimento circulatório.

5.1.2 Regras gerais de dimensionamento

A dimensão da turborotunda é tendencialmente similar à da rotunda normal, com o mesmo número de vias de circulação no anel. É no entanto recomendável que o anel não possua mais do que duas vias (três no máximo), já que para valores superiores a turborotunda tenderá a diminuir os níveis de eficiência e sobretudo de segurança.

As vias que compõem a espiral do canal de circulação devem apresentar largura e raio de curvatura que respondam às exigências do veículo de projeto (veículo trator-semireboque de três ou mais eixos, com 16,5 m de comprimento), sendo aplicáveis os valores de dimensionamento típicos das rotundas normais com uma via no anel.

Segundo o MVW [20] o dimensionamento de uma turborotunda assenta na construção de uma espiral (denominada correntemente como *Espiral de Arquimedes*). Esta espiral é construída a partir de semicírculos, centrados em dois pontos contidos sobre um eixo de translação, equidistantes do centro geométrico (CG) e distantes entre si de um valor igual ao valor da largura das vias de circulação acrescido de bermas (ΔR); $R_i = R_{i-1} + \Delta R$. Desta forma, os semicírculos centrados num ponto (C1) serão desenhados de um dos lados do eixo, enquanto os centrados no outro ponto (C2) serão desenhados do lado oposto (ver Fig.6).

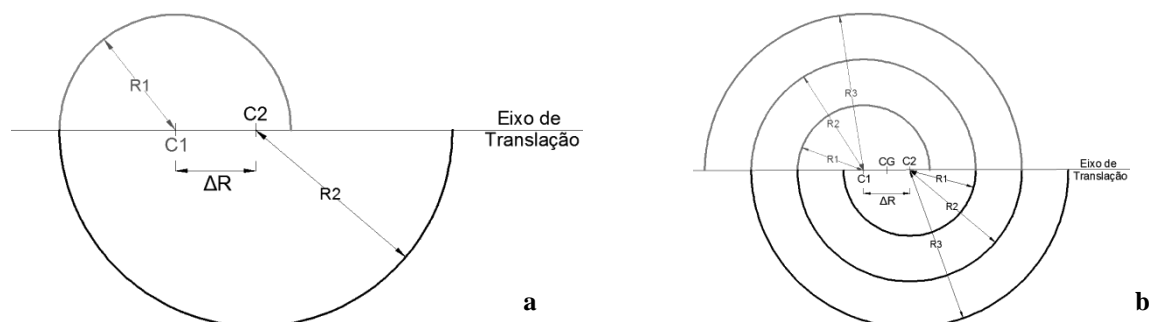


Fig.6. Construção da espiral (adaptado de [21])

O Quadro 1 apresenta a relação entre raios em turborotundas, em função da dimensão global da solução (e dos condicionalismos de espaço) e da largura da via pretendida (adaptado de [22]):

Quadro 1. Dimensões dos raios das turborotundas (adaptado de [22])

$\Delta R=4,20$ m (largura da via =3,50 m)				
Elemento	Mini	Standard	Médio	Grande
R1 [m]	10,50	12,00	15,00	20,00
R2 [m]	14,70	16,20	19,20	24,20
R3 [m]	18,90	20,40	23,40	28,40
$\Delta R=4,45$ m (largura da via =3,75 m)				
R1 [m]	10,50	12,00	15,00	20,00
R2 [m]	14,95	16,45	19,45	24,45
R3 [m]	19,40	20,90	23,90	28,90
$\Delta R=4,70$ m (largura da via =4,00 m)				
R1 [m]	10,50	12,00	15,00	20,00
R2 [m]	15,20	16,70	19,70	24,70
R3 [m]	19,90	21,40	24,40	29,40

O posicionamento do eixo de translação é um aspeto fundamental para que a velocidade de atravessamento dos veículos seja a mais adequada possível, assim como para a adoção de trajetórias com o mínimo de desconforto. Em termos construtivos, recomenda-se que, numa primeira fase, o eixo de translação passe pelo centro geométrico e coincida com o eixo associado ao fluxo dominante (Fig.7_a). Posteriormente traçam-se duas linhas auxiliares (horizontal e vertical) coincidentes com a berma exterior das vias de entrada e saída de um quadrante que acomode o eixo de translação. Medem-se as distâncias A e B - ver Fig.7_b (distância entre a linha auxiliar e o extradorso da via correspondente ao movimento na espiral) -, que representa a diferença de deflexões associada a cada um dos movimentos de entrada. A solução final deverá resultar de um processo iterativo de ajustes à rotação do eixo de modo a minimizar a diferença entre A e B.

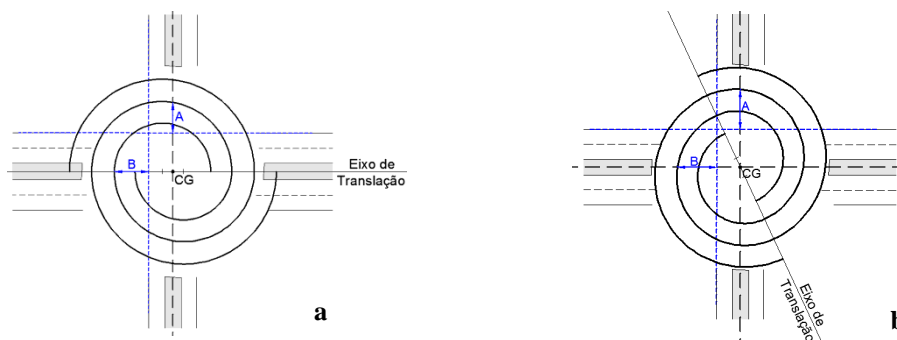


Fig. 7. Posicionamento do eixo de translação: (a) posição inicial; (b) posição final (adaptado de [14])

Os valores dos raios de concordância com a ilha central devem ser selecionados de modo a controlar a velocidade de atravessamento do anel a qual, idealmente, se deve aproximar dos 40 km/h [22,23]. Por sua vez, os raios de entrada e de saída devem respeitar as regras gerais estabelecidas para as rotundas normais. Alguns autores [22,23] defendem a adoção de raios mínimos de entrada ($R_{e,min}$) e de saída ($R_{s,min}$) de 12 e de 15 m, respetivamente. De modo a salvaguardar a operacionalidade dos veículos pesados, a largura mínima para as vias de entrada deverá ser de 4 m e, para as vias de saída de 4,5 m [23] – ver Fig. 8.

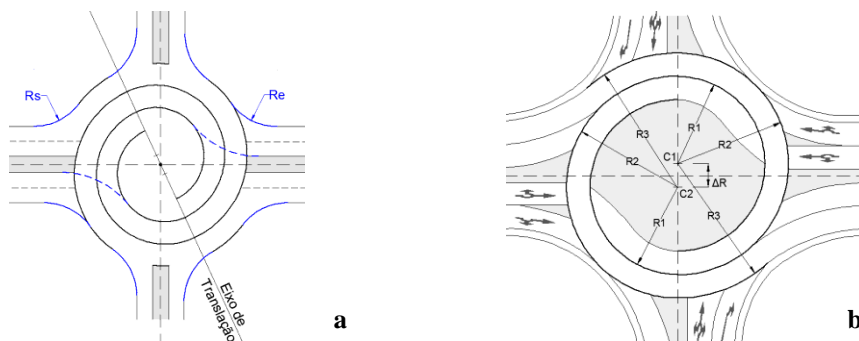


Fig. 8. Turborotunda – Raios de entrada e saída: (a) fase inicial; (b) fase final

5.1.3 Pormenores construtivos e de marcação

Na turborotunda, quer os elementos físicos de canalização quer a marcação rodoviária, assumem um papel determinante na orientação do condutor. Os lancis adotados na separação longitudinal das vias devem ser galgáveis e rebaixados (lancis rampeados com 7 cm de altura máxima e 30 cm de largura) e devidamente delineados por guias – Fig.3_b e c. A ilha central deve ser circundada por uma orla transponível, revestida de material de cor e textura contrastante com a faixa de rodagem [24], de modo a melhorar a operacionalidade dos veículos longos (Fig.3_a). A disponibilização de informação adequada ao condutor é igualmente relevante à escolha atempada da via de aproximação, assumindo aqui particular relevância o recurso a painéis de pré-aviso de afetação de vias e a marcações no pavimento – tipo setas de seleção. Todos estes dispositivos devem ser dimensionados, respeitando a lei vigente, designadamente o Código da Estrada e o RST (Fig.9_a). Refira-se no entanto a necessidade de se criar, a título piloto, uma nova configuração de setas de seleção de modo a não violar a Convenção de Viena (Fig.9_a).



Fig. 9. Turborotunda [24]: (a) sinais de afetação de vias; (b) painéis de pré-aviso; (c) setas de seleção

5.2 Estimação de Capacidades

5.2.1 Modelo matemático

A falta de consenso em relação ao nível de desempenho assegurado pela turborotunda deve-se, em grande parte aos diferentes métodos de análise adotados, sendo que os métodos clássicos não descrevem satisfatoriamente as interações complexas entre correntes de tráfego que ocorrem em rotundas com múltiplas vias. Com efeito, existem diferenças significativas entre uma rotunda convencional e uma turborotunda, tanto em termos de geometria como de funcionamento, que requerem uma abordagem mais versátil e individualizada ao nível da via de entrada. Neste contexto, é proposta a adoção de uma nova metodologia de cálculo baseada na teoria de *gap-acceptance* e, especificamente, na generalização da fórmula de Tanner [25]. Esta fórmula é válida na presença de diversas vias conflituantes, admitindo-se que a distribuição de intervalos entre veículos em cada uma dessas vias segue a distribuição Cowan M3. A capacidade de uma via de entrada quando intersecta uma via conflituante é dada pela seguinte equação (1):

$$C = \frac{q_c \phi e^{-\lambda(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-\lambda t_f}} \quad (1)$$

onde,

- C = capacidade da entrada (veíc./s)
- q_c = fluxo conflituante (veíc./s)
- t_c = intervalo crítico (s)
- t_f = intervalo mínimo (s)

e onde ϕ , λ e Δ são parâmetros da distribuição de intervalos entre veículos na via conflituante. Trabalhos de investigação nacionais [26] demonstraram que para as condições de circulação portuguesas, $\Delta = 2$ s, e que os parâmetros ϕ e λ podem ser estimados pelas equações (2) e (3):

$$\phi = \begin{cases} 1 & \text{se } q_c < 0.178 \\ 1.553(1 - 2q_c) & \text{se } 0.178 < q_c \leq 0.5 \\ 0 & q_c > 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\phi q_c}{1 - \Delta q_c} \quad (3)$$

No caso das entradas que conflituam com duas vias no anel, a formulação assume a forma da Eq. (4), onde os índices 1 e 2 indicam a via conflituante (1 – via exterior, mais próxima da entrada, 2 – via interior, mais afastada) e os parâmetros λ e ϕ são calculados recorrendo equações (2) e (3) (com $\Delta = 2$ s). A expressão é aplicada individualmente a cada via de entrada, podendo os parâmetros t_c e t_f assumir valores diferenciados consoante a via de entrada (esquerda/direita).

$$C = \frac{\exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)(t_c - \Delta)](\lambda_1 + \lambda_2)\phi_1\phi_2}{1 - \exp[-t_f(\lambda_1 + \lambda_2)](\phi_1 + \lambda_1\Delta)(\phi_2 + \lambda_2\Delta)} \quad (4)$$

Da aplicação do modelo é possível concluir que a capacidade de uma via de entrada é tanto maior quanto mais equilibrada for a distribuição de tráfego entre as vias conflituantes no anel. Com efeito, uma distribuição equilibrada aumenta a probabilidade de dois veículos conflituantes circularem lado a lado ou com ligeira sobreposição, diminuindo assim o desperdício de oportunidades oferecidas aos veículos em espera junto à entrada. Consequentemente, a aplicação desta formulação exige a quantificação do tráfego conflituante segregado por via de circulação no anel. Esta repartição depende, por sua vez, da distribuição lateral do tráfego nas restantes entradas o que exige uma metodologia de cálculo sequencial [18] – ver Fig.10.

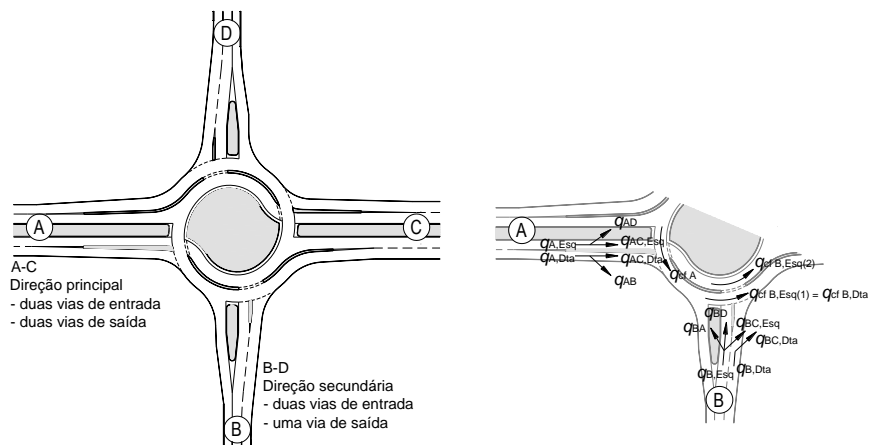


Fig.10. Repartição de tráfego

Se se admitir, para simplificar a análise, que não há inversões marcha, os condutores que se deslocam para os ramos B ou D a partir de A utilizam, respetivamente, a via da direita ou a via da esquerda. Já os condutores que deslocam para o ramo C (ida em frente) podem optar por qualquer uma das vias disponibilizadas, optando tendencialmente pela que apresenta menor fila de espera de modo a minimizar o tempo de viagem. Consequentemente, num estado de equilíbrio, as duas vias de entrada têm o mesmo nível de congestionamento e a proporção de tráfego de atravessamento A-C que utiliza a via da esquerda é dada pela Eq.(5):

$$p_{Esq} = \frac{C_{Esq}(q_2 + q_3) - C_{Dta} q_1}{q_2(C_{Esq} + C_{Dta})}, p_{Esq} \in [0, 1] \quad (5)$$

onde C_{Esq} e C_{Dir} é a capacidade da via da esquerda e da direita, respetivamente, e q_1 , q_2 e q_3 é a procura para os movimentos de viragem à esquerda, ida em frente e viragem à direita, respetivamente. Analogamente, a proporção do tráfego B-C que utiliza a via da esquerda é dada pela Eq. (6). Estando determinada a repartição de tráfego nas vias de uma entrada, é então possível quantificar o tráfego conflituante na entrada a jusante e proceder ao cálculo das respetivas capacidades.

$$p_{Esq} = \frac{C_{Esq} q_3 - C_{Dta} (q_1 + q_2)}{q_3 (C_{Esq} + C_{Dta})}, p_{Esq} \in [0, 1] \quad (6)$$

5.2.2 Exemplo de aplicação

De modo a facilitar a interpretação do modelo apresenta-se, de forma detalhada, um exemplo de aplicação. Admita-se que os níveis de procura da turborotunda são os apresentados na matriz O/D do Quadro 2 e que os intervalos críticos e mínimos são os indicados no Quadro 3.

Quadro 2. Matriz origem-destino (veículos/h)

	Destino			
Origem	A	B	C	D
A	0	250	700	220
B	150	0	190	220
C	600	50	0	280
D	250	180	660	0

Quadro 3. Intervalos críticos e mínimos(s)

Direção principal		Direção secundária	
Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
t_c	t_f	t_c	t_f
3.6	2.2	3.9	2.1

1. Calcular o tráfego conflituante para cada uma das vias de entrada na direção dominante:

$$q_{cf A, Esq} = q_{CB} + q_{DC} + q_{DB} = 890 \text{ veíc./h} \quad q_{cf A, Dta} = q_{cf A, Esq}$$

$$q_{cf\ C, Esq} = q_{AD} + q_{BD} + q_{BA} = 590 \text{ veíc./h} \quad q_{cf\ C, Dta} = q_{cf\ C, Esq}$$

2. Calcular a capacidade de cada entrada na direção dominante utilizando a Eq. (1) para uma via conflituante (cálculos com veíc./s):

$$\begin{aligned} C_{A,Esq} &= C \left| q_{cf} = 890 \text{ veíc./h}, t_c = 3.6 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s} \right. & C_{A,Esq} &= 663 \text{ veíc./h} \\ C_{A,Dta} &= C \left| q_{cf} = 890 \text{ veíc./h}, t_c = 3.9 \text{ s}, t_f = 2.1 \text{ s} \right. & C_{A,Dta} &= 609 \text{ veíc./h} \\ C_{C,Esq} &= C \left| q_{cf} = 590 \text{ veíc./h}, t_c = 3.6 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s} \right. & C_{C,Esq} &= 962 \text{ veíc./h} \\ C_{C,Dta} &= C \left| q_{cf} = 590 \text{ veíc./h}, t_c = 3.9 \text{ s}, t_f = 2.1 \text{ s} \right. & C_{C,Dta} &= 927 \text{ veíc./h} \end{aligned}$$

3. Para cada entrada da direção dominante, calcular a proporção do tráfego de atravessamento que utiliza a via da esquerda pela Eq. (5) e obter os tráfegos de entrada:

$$\begin{aligned} p_{A,Esq} &= p_{Esq} \left| q_1 = q_{AD}, q_2 = q_{AC}, q_3 = q_{AB} \right. & p_{A,Esq} &= 0.557 \\ p_{C,Esq} &= p_{Esq} \left| q_1 = q_{CB}, q_2 = q_{CA}, q_3 = q_{CD} \right. & p_{C,Esq} &= 0.706 \\ q_{A,Esq} &= q_{AC} p_{A,Esq} + q_{AD} & &= 610 \text{ veíc./h}, & q_{A,Dta} &= q_{AC} (1 - p_{A,Esq}) + q_{AB} = 560 \text{ veíc./h} \\ q_{C,Esq} &= q_{CA} p_{C,Esq} + q_{CB} & &= 474 \text{ veíc./h} & q_{C,Dta} &= q_{CA} (1 - p_{C,Esq}) + q_{CD} = 456 \text{ veíc./h} \end{aligned}$$

4. Calcular o tráfego conflituante para cada entrada da direção secundária (os índices 1 e 2 representam, respectivamente, a via mais próxima e mais afastada da linha de cedência de paragem):

$$\begin{aligned} q_{cf B,Esq(1)} &= (1 - p_{A,Esq}) q_{AC} + q_{DC} & &= 970 \text{ veíc./h} & q_{cf B,Dta} &= q_{cf B,Esq(1)} \\ q_{cf B,Esq(2)} &= p_{A,Esq} q_{AC} + q_{AD} & &= 610 \text{ veíc./h} \\ q_{cf D,Esq(1)} &= (1 - p_{C,Esq}) q_{CA} + q_{BA} & &= 326 \text{ veíc./h} & q_{cf D,Dta} &= q_{cf D,Esq(1)} \\ q_{cf D,Esq(2)} &= p_{C,Esq} q_{CA} + q_{CB} & &= 474 \text{ veíc./h} \end{aligned}$$

5. Calcular a capacidade de cada via de entrada na direção secundária com a Eq. (4) para a via da esquerda (duas vias de circulação) e com a Eq. (1) para a via da direita (uma via de circulação):

$$\begin{aligned} C_{B,Esq} &= C \left| q_1 = q_{cf B,Esq(1)}, q_2 = q_{cf B,Esq(2)}, t_c = 3.2 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s} \right. & C_{B,Esq} &= 426 \text{ veíc./h} \\ C_{B,Dta} &= C \left| q = q_{cf B,Dta}, t_c = 3.9 \text{ s}, t_f = 2.1 \text{ s} \right. & C_{B,Dta} &= 536 \text{ veíc./h} \\ C_{D,Esq} &= C \left| q_1 = q_{cf D,Esq(1)}, q_2 = q_{cf D,Esq(2)}, t_c = 3.2 \text{ s}, t_f = 2.2 \text{ s} \right. & C_{D,Esq} &= 943 \text{ veíc./h} \\ C_{D,Dta} &= C \left| q = q_{cf D,Dta}, t_c = 3.9 \text{ s}, t_f = 2.1 \text{ s} \right. & C_{D,Dta} &= 1275 \text{ veíc./h} \end{aligned}$$

6. Para cada entrada da direção secundária, calcular a proporção de tráfego de viragem à direita a utilizar a via da esquerda pela Eq. (6) e obter os tráfegos de entrada:

$$\begin{aligned} p_{B,Esq} &= p_{Esq} \left| q_1 = q_{BA}, q_2 = q_{BD}, q_3 = q_{BC} \right. & p_{B,Esq} &= 0 \\ p_{D,Esq} &= p_{Esq} \left| q_1 = q_{DC}, q_2 = q_{DB}, q_3 = q_{DA} \right. & p_{D,Esq} &= 0 \\ q_{B,Esq} &= q_{BA} + q_{BD} + p_{B,Esq} q_{BC} & &= 370 \text{ veíc./h} & q_{B,Dta} &= q_{BC} (1 - p_{B,Esq}) = 190 \text{ veíc./h} \\ q_{D,Esq} &= q_{DC} + q_{DB} + p_{D,Esq} q_{DA} & &= 840 \text{ veíc./h} & q_{D,Dta} &= q_{DA} (1 - p_{D,Esq}) = 250 \text{ veíc./h} \end{aligned}$$

7. Obter as taxas de saturação de cada via de entrada: $x = q/C$ (Quadro 4).

Quadro 4. Taxas de saturação de cada via de entrada

	Entrada A		Entrada B		Entrada C		Entrada D	
	Esq.	Dta	Esq.	Dta	Esq.	Dta	Esq.	Dta
q (veíc./h)	610	560	370	190	474	456	840	250
C (veíc./h)	663	609	426	536	962	927	943	1275
x	92%	92%	87%	35%	49%	49%	89%	20%

Este exemplo evidencia as consequências da alocação rígida de movimentos nas vias secundárias que frequentemente conduz a taxas de saturação superiores na via da esquerda e consequente desperdício de capacidade na via da direita. Na direção dominante tal não acontece porque os condutores têm a possibilidade de selecionar a via menos saturada para os movimentos de atravessamento. Note-se ainda que nem sempre as taxas de saturação são iguais para as vias de entrada na direção dominante, bastando para tal que os movimentos de atravessamento sejam pouco significativos relativamente às viragens a esquerda ou à direita. Recorrendo a esta metodologia os autores concluíram [18] que as turborotundas apenas oferecem maior capacidade comparativamente à rotunda convencional, de dimensões semelhantes, em casos muito específicos e raros de repartição de tráfego, nomeadamente quando a proporção de viragens à direita nos ramos secundários é muito alta (mais de 60%). Tal como referido, estas conclusões contrariam estudos anteriores [13,14,18,19,24] baseados em metodologias simplificadas que apontavam, de forma consensual, para um aumento não negligenciável da capacidade, comparativamente a rotundas normais.

6 CONCLUSÕES

A turborotunda surgiu recentemente como forma de ultrapassar problemas de funcionamento característicos das rotundas tradicionais com múltiplas vias. Por se tratar de um conceito em desenvolvimento considerou-se ser relevante desenvolver estudos capazes de avaliar os níveis previsíveis de desempenho, ao mesmo tempo que se consolidam regras básicas de apoio ao seu dimensionamento. Nessa linha de ação, este artigo apresentou o conceito de turborotunda, as suas tipologias mais comuns e domínio privilegiado de aplicação, apresentando ainda algumas regras gerais e específicas de dimensionamento. Complementarmente foi apresentado um modelo de estimação de capacidades preparado para responder às condições gerais de circulação nacionais.

A análise do modo de funcionamento da solução alternativa em comparação com uma rotunda normal de duas vias de circulação, permitiu concluir que a imposição de níveis mínimos de deflexão, o controlo da velocidade e a redução do número de pontos de conflito, se traduz, de forma irrefutável, num aumento significativo dos níveis de segurança. Estes resultados estão em conformidade com os resultados da experiência estrangeira [13,14].

Já no que respeita à capacidade, os resultados não são consensuais. Alguns autores têm vindo a defender um aumento não negligenciável da capacidade, embora se considere que tais resultados se devam à aplicação de metodologias simplistas que não representam a complexidade do sistema real de tráfego. A aplicação do modelo adaptado às condições nacionais permitiu concluir que apenas em casos muito específicos e raros de repartição de tráfego será de esperar que uma turborotunda seja vantajosa relativamente a uma rotunda convencional de dimensão global similar.

A consolidação destes resultados é atualmente dificultada pela inexistência de qualquer turborotunda construída em Portugal, o que impossibilita a recolha de dados reais para calibração e validação dos modelos existentes. Também a revisão do atual enquadramento legal, designadamente ao nível do Regulamento de Sinalização do Tráfego, se afigura indispensável e premente.

7 AGRADECIMENTOS

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto AROUND – “Novos Instrumentos de Avaliação Operacional e Ambiental de Rotundas”, projeto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência e pelo Orçamento do programa COMPETE - Programa Operacional Fatores de Competitividade na sua componente FEDER.

8 REFERÊNCIAS

1. M. C. Bastos Silva, “Definição de uma Metodologia de Concepção de Cruzamentos Giratórios,” Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.
2. M. Brown, *The design of Roundabouts – state of the art review*, 1995.
3. FHWA, “Roundabouts: An Informational Guide”, Federal Highway Administration, Virginia, USA, Report 672, 2000.

4. R. D. Hall and A. J. Surl, "Accidents at four-arm roundabouts and dual-carriageway junctions – some preliminary findings", *Traffic Engineering and Control*, vol. 22, no. 6, pp. 339–344, 1981.
5. G. Maycock and R. D. Hall, "Accidents at 4-arm roundabouts," Wokingham, GB, Report 1120, 1984.
6. A. M. C. Bastos Silva, *Aplicação e Concepção de Intersecções Giratórias nas Redes Viárias Urbana e Rural Portuguesas*, Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, 1997.
7. SETRA, *Aménagement des Carrefours Interurbains sur les routes principales – Carrefours plans - Guide Technique*, Service d' Bagneux, France, 1998.
8. B. Guichet, "Typologie des Accidents dans les Giratoires Urbains", *Giratoire* 92, pp. 145–152, 1992.
9. W. Brilon, "Roundabouts: A State of the Art in Germany", *National Roundabout Conference*, 2005.
10. H. Bovy and K. Dietrich, *Guide Suisse des Giratoires*, Lausanne, 1991.
11. DfT, "Geometric Design of Roundabouts", TD16-07, *Design Manual for Roads and Bridges (DMRB)*, vol. 6, Department for Transportation, Ed. 2007.
12. Austroads, "Part 6 – Roundabouts", *Guide to Traffic Engineering Practice*, Austroads National Office, Ed. Sidney, 1993.
13. R. Mauro and F. Branco, "Comparative Analysis of Compact Multilane Roundabouts and Turbo-roundabouts", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, no. 4, pp. 316–322, 2010.
14. L. G. H. Fortuijn, "Turbo-Kreisverkehre Turbo-Kreisverkehre Entwicklungen und Erfahrungen." Aktuelle Theme der Strassenplanung, Donnerstag, 2007.
15. L. G. H. Fortuijn, "Turbo Roundabouts - Design Principles and Safety Performance", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2096, pp. 16–24 December, 2009.
16. CROW, *Turborotonde*, Dutch Information and Technology Platform, 2008.
17. R. Mauro and M. Cattani, "Potential accident rate of turbo-roundabouts", *4th International Symposium on Highway Geometric Design*, 2010.
18. A. L. P. Vasconcelos, A. J. D. M. Seco e A. Bastos Silva, "Capacity of normal and turbo-roundabouts: comparative analysis", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE)*, 2012.
19. A. Bastos Silva, A. Vasconcelos e S. Santos, "As Turbo-rotundas, avaliação do seu potencial de desempenho", *XXV ANPET - Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes*, 7-11 Novembro, 2011.
20. MVW, *Roundabouts Application and Design - A Pratical Manual*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Partners for Roads, 2009.
21. O. Giuffrè, M. Guerrieri, and A. Granà, "Turbo-Roundabout General Design Criteria and Functional Principles: Case Studies from Real World", *4th International Sumposium on Highway Geometric Design*, Valencia, Spain, 2-5 June, 2010.
22. M. Guerrieri, D. Ticali, and F. Corriere, "Turbo roundabouts: geometric design parameters and performance analysis", *GSTF Journal on Computing (JoC)*, vol. 2, no. 1, pp. 227–232, 2012.
23. F. Corriere and M. Guerrieri, "Performance Analysis of Basic Turbo-Roundabouts in Urban Context", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 53, pp. 622–632, 2012.
24. R. Van Der Horst, M. Martens, and J. Kik, "Evaluation of signalised high-volume multi-lane turbo roundabouts : road scene analysis , road user survey, and video-based analysis of road user behaviour", *21st ICTCT workshop*, 2008.
25. O. Hagring, "A further generalization of Tanner's formula", *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 32, no. 6, pp. 423–429, 1998.
26. A. Vasconcelos, A. Seco, and A. Bastos Silva, "Estimating the parameters of Cowan's M3 headway distribution for roundabout capacity analyses," *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2012.